

任雪梅、谭俊林、马禾青等, 2013, 中国大陆及边邻地区 6 级以上地震序列的最大余震统计特征, 中国地震, 29 (4), 480 ~ 488。

中国大陆及边邻地区 6 级以上地震序列的最大余震统计特征

任雪梅 谭俊林 马禾青 曾宪伟

宁夏地震局, 银川市北京东路 244 号 750001

摘要 依据 1966 年以来中国大陆及边邻地区记录相对完备的 6 级以上地震序列资料, 统计研究了地震的破裂类型和不同破裂类型下余震序列特征等, 得到了不同破裂类型下不同余震序列比例和优势分布、主震震级与最大余震震级差的经验关系。主震与最大余震的震级关系线性较好, 得到的经验公式可以为中国大陆及边邻地区同类地震的最大余震震级判定提供参考; 最大余震发生在主震后 10 天内的比例为 43.8% ~ 81.8%, 正断型和走滑型中的孤立型的最大余震发生在主震后 10 天内的比例高达 80%。

关键词: 中国大陆及边邻地区 序列类型 破裂类型 最大余震震级 时间间隔 主震震级
[文章编号] 1001-4683 (2013)04-0480-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

研究余震序列的学者很多, 国外有 Utsu (1961)、Lutz (1986)、Lutz 等 (1995)、Chapman 等 (1997) 等, 国内有周蕙兰等 (1982)、吴开统等 (1990)、蒋海昆等 (2006b) 对我国的余震序列相继做了详细研究。本文对 1966 年 1 月 ~ 2012 年 11 月中国大陆及边邻地区 (边界 50km 之内区域) 发生的 139 次 6.0 级以上地震进行了统计研究, 着重对这些地震的破裂类型、余震序列类型及主震与最大余震的震级差和发生时间间隔等进行了统计、分析和总结, 试图得到不同破裂类型地震的最大余震发生时间和震级的统计关系, 从而为最大余震的研究和预测提供参考。周蕙兰等 (1982) 和吴开统等 (1990) 未统计主震和最大余震的经验关系, 只是给出了最大余震和主震平均差值; 蒋海昆等 (2006b) 依据 1970 年以来记录相对完整的 294 次 5.0 级以上地震序列资料, 研究中国大陆中强地震余震序列统计特征, 探讨序列类型、最大余震震级、强余震活动持续时间等与主震震级及主震断层性质之间的关系, 但研究序列统计特征时没有考虑破裂类型。本文研究了 1966 年以来中国大陆及边邻地区 6 级以上地震序列, 考虑了不同破裂类型下最大余震的统计特征。作为研究样本的 6 级以上地震序列资料较为完整和丰富, 而且 6 级以上地震更具破坏性, 因此针对中国大陆及边邻地区 6 级以上

[收稿日期] 2013-06-19; [修定日期] 2013-09-18

[项目类别] 宁夏回族自治区科技攻关计划项目 (102164170) 资助

[作者简介] 任雪梅, 女, 1968 年生, 博士, 副研究员。主要从事地震预报和工程地震等研究工作。

E-mail: rxm1025@163.com

地震序列最大余震的研究,对余震预测具有重要意义,对于不同类型的最大余震预测研究也可提供重要的参考。

1 余震序列类型与资料选取

“余震序列”的定义及序列类型的具体划分标准,依据不同作者的研究重点不同而有所差异。序列类型主要依据主震所释放能量占全序列所释放总能量的比例 R_E 来进行划分(周蕙兰等,1982)。 $R_E \geq 99.99\%$ 为孤立型, $R_E < 90\%$ 为震群型或双震型, $90\% \leq R_E < 99.99\%$ 为主余型。粗略地以序列中两次最大地震的能量代替序列总能量,可得与上述能量判据相对应的、以 $\Delta M = M_0 - M_1$ 进行序列分类的判据(蒋海昆,2006a),以主震 M_0 与最大余震 M_1 之间的震级差 $\Delta M = M_0 - M_1$ 进行序列类型划分:① 孤立型(IET): $\Delta M \geq 2.5$,且余震次数较少;② 主余型(MAT): $0.6 \leq \Delta M < 2.5$;③ 多震型(MMT): $\Delta M < 0.6$,包括其他作者提出的“双震型”及“震群型”。

1966 年 1 月 ~ 2012 年 11 月中国大陆及边邻地区一共发生了 6.0 级以上地震 168 次(不包括余震),本文统计了该时段的 139 次(132 次主震和 7 次余震)6.0 级以上地震。对这些地震的破裂类型、余震序列类型及主震与最大余震的震级差以及发生时间间隔等进行了统计、分析和总结。其它 36 次地震或是因属晚期强余震,或是因余震资料收集不全(主要是青海和西藏地区的 6.0 级以上地震)而没有进行统计。破裂类型按走滑、正断、逆断(逆冲)进行分类,统计资料来源于《中国震例》(1~9 册)(张肇诚等,1988、1990a、1990b、1999、2000;陈棋福等,2002a、2002b、2002c、2008)和中国台网中心提供的序列类型和参数。其它没有序列资料的地震,根据中国地震台网中心提供的“中国地震弱震目录资料”选取余震序列,其余震序列类型判定主要依据主震和余震的能量比及主震和次大余震的震级差来进行。从《中国震例》(1~9 册)(张肇诚等,1988、1990a、1990b、1999、2000;陈棋福等,2002a、2002b、2002c、2008)和各省地震局资料中,收集了大量的震源机制解资料,得到了地震的破裂类型。

本文统计余震的时间和空间范围以 K-K 法的时空窗范围为标准,晚期强余震没有统计在内。采用通用的 K-K (Keilis-Borok et al,1980) 法的空间、时间窗范围见表 1。

表 1 K-K 法的余震空间、时间窗

主震震级	R_0 (km)	T_0 (d)	主震震级	R_0 (km)	T_0 (d)
5.0 ~ 5.4	50	183	7.0 ~ 7.4	100	730
5.5 ~ 5.9	50	365	7.5 ~ 7.9	150	913
6.0 ~ 6.4	70	456	8.0 ~ 8.4	150	1095
6.5 ~ 6.9	100	548	8.5	150	1290

注: R_0 为空间窗, T_0 为时间窗

本文统计的地震中仅有 2008 年 5 月 12 日汶川地震为 8.0 级,其余震是单侧分布,空间窗长度大于 300km,明显大于本文规定的 8 级以上地震的余震空间窗长度 150km,其最大余震震中距离主震震中 259km。因此,本文对该地震最大余震的统计时间窗按 K-K 法的时间窗,而空间窗则按实际的余震震中分布范围确定。

2 1966 年以来中国大陆及边邻地区 6.0 级以上地震的序列特征

统计的 139 次 6.0 级以上地震(125 组)中包括 7 次余震,主震占 1966 年以来中国大陆

及边邻地区发生的全部 6.0 级以上地震 (168 次) 的 76.2%。139 次地震中走滑型地震 98 次, 占统计地震总数的 70.5%; 逆断 (逆冲) 型地震 15 次, 占 10.8%; 正断型地震 17 次, 占 12.2%; 有 9 次地震的破裂类型未能确定, 属于资料不全的, 占 6.5%。各类破裂类型的 130 次地震中不同序列类型地震的次数和所占同一破裂类型的百分比见表 2。从表 2 可以看出, 主余型序列在 3 种破裂类型中所占比例均大于或等于 60%, 在正断破裂中甚至高达 76.5%; 在走滑、逆断 (逆冲) 破裂类型中双震比例为 20% ~ 30%, 而在正断破裂类型中双震比例仅为 5.9%。

表 2 1966 年以来中国大陆及边邻地区 6.0 级以上地震的破裂类型和序列分类

地震破裂类型	序列类型	地震个数	所占百分比 (%)
走滑	主余型	64	65.3
	多震型 (双震型)	23 (14)	23.5 (21.9)
	孤立型	11	11.2
逆断 (逆冲)	主余型	9	60.0
	多震型 (双震型)	4 (4)	26.7 (26.7)
	孤立型	2	13.3
正断	主余型	13	76.5
	多震型 (双震型)	3 (1)	17.6 (5.9)
	孤立型	1	5.9

注: 其中双震型包含在多震型里

如果不考虑破裂类型, 主余型的地震组共 88 个, 占统计地震组总数的 70.4%; 多震型 23 组, 占 18.4%; 双震型 11 组, 占 8.8%; 孤立型 14 组, 占 11.2%。14 组孤立型地震的破裂类型多为走滑型 (11 组), 占总数 78.6%; 多震型和双震型地震的破裂类型也多为走滑型, 23 组多震型地震中有 14 组为走滑型, 占总数 60.9%; 但在正断、逆断 (逆冲) 破裂类型中也有孤立型、多震型和双震型的地震。

3 1966 年以来中国大陆及边邻地区 6 级以上地震最大强余震发生的时间、与主震的震级差等特点的统计研究

3.1 走滑型主震和最大余震震级的关系

对 1966 年以来中国大陆及边邻地区 125 组 6.0 级以上地震的最大余震震级与主震震级差做一元线性回归, 结果见图 1。

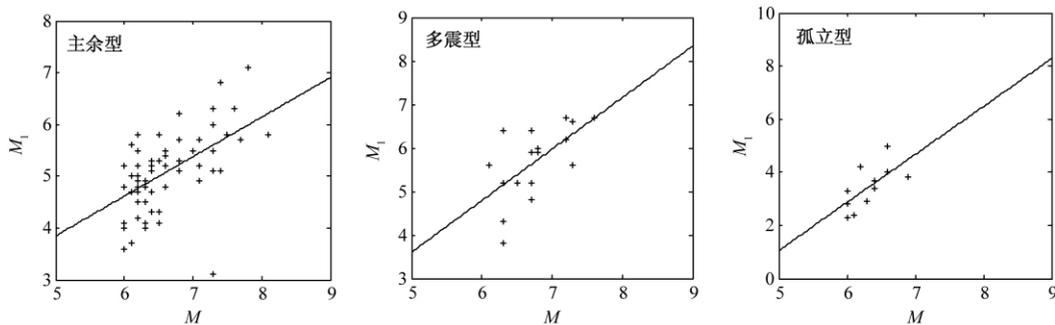


图 1 走滑破裂的各型地震震级与最大余震震级关系

根据一元线性回归,得到走滑破裂的各类型地震的最大余震震级 M_1 与主震震级 M 的经验关系式分别为

主余型:

$$M_1 = 0.764 \times M + 0.0299 \quad (1)$$

其中样本数 $N = 63$, 相关系数为 0.551。

多震型:

$$M_1 = 1.184 \times M - 2.317 \quad (2)$$

其中 $N = 17$, 相关系数为 0.613。

孤立型:

$$M_1 = 1.806 \times M - 7.974 \quad (3)$$

其中 $N = 11$, 相关系数为 0.657。

以上相关系数都通过了置信概率 95% 的显著性检验。

图 1 表明主震震级和最大余震震级正相关,二者之间呈线性关系;走滑破裂的主余型和多震型地震的主震与最大余震的震级差为 0.5 ~ 2.5 (图 2),其均值分别为 1.5 和 1.09,前者与周蕙兰等(1982)给出的均值 1.5 相同,二者与巴特定律中“最大余震震级一般比主震小 1.2”的规律相差不大(吴开统等,1990)。走滑破裂的孤立型地震的主震与最大余震的震级差为 2.6 ~ 3.7,均值为 2.88,远大于巴特定律中的 1.2。

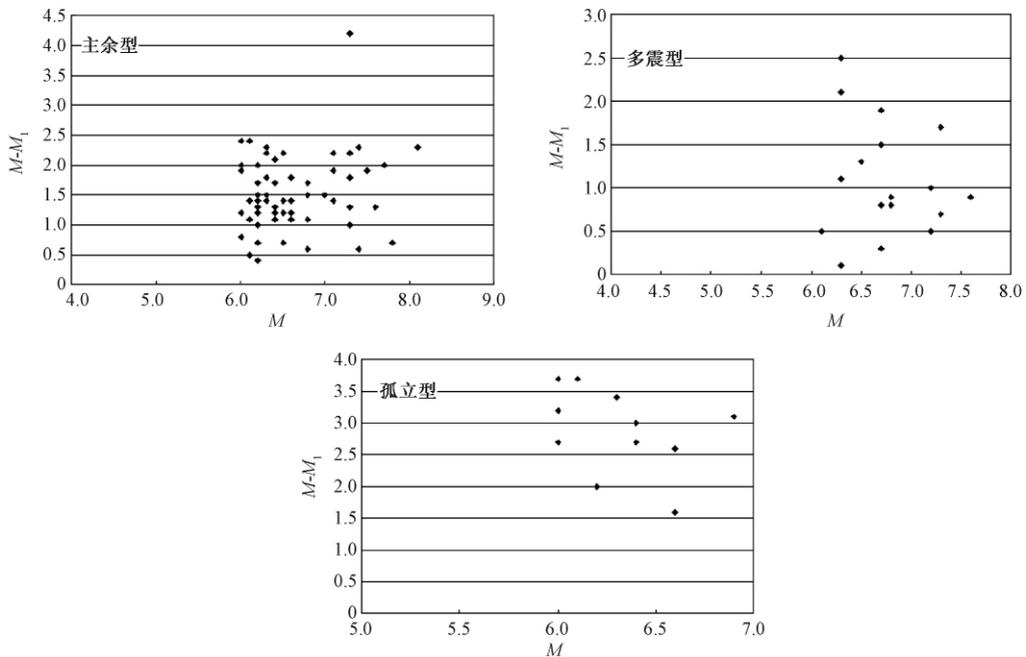


图 2 走滑破裂的各型地震的主震(震级 M)与最大余震(震级 M_1)的震级差

由于 23 个多震型地震中有 14 个是双震型,因此本文把双震型中的两个最大地震都视为主震,而小于两个主震的次大余震视为最大余震,震级差为第一个主震和最大余震的震级差。研究结果显示走滑破裂的多震型地震的主震震级和最大余震的震级差均值为 1.09。

之所以这样统计是因为双震型中两个最大主震往往相伴发生,发生的时间相隔不大,震级相差不大,在实际震情判定中需要给出最大余震出现的时间和大小。

综上所述,1966年以来中国大陆及边邻地区 6.0 级以上走滑破裂型地震的 3 类序列中主震与最大余震的震级关系线性较好,式(1)~(3)可为中国大陆同类地震的最大余震震级判定提供参考。

3.2 逆断(逆冲)地震的主震和最大余震的关系

拟合得到逆断(逆冲)破裂的最大余震震级 M_1 与主震震级 M 的经验关系式为

$$M_1 = 1.161 \times M - 2.947 \quad (4)$$

其中样本数 $N = 12$, 相关系数为 0.714, M_1 与 M 之间的线性关系较好(图 3(a))。相关系数都通过了置信概率 95% 的显著性检验。主震与最大余震的震级差为 1.6~2.5(图 3(b)), 其震级差的均值为 1.73, 大于巴特定律中数值为 1.2 的震级差, 也大于周蕙兰等(1982)的 1.5 差值和吴开统等(1990)的 1.4 差值, 这与统计的逆断(逆冲)破裂中的主震序列类型大多为主余型有关。

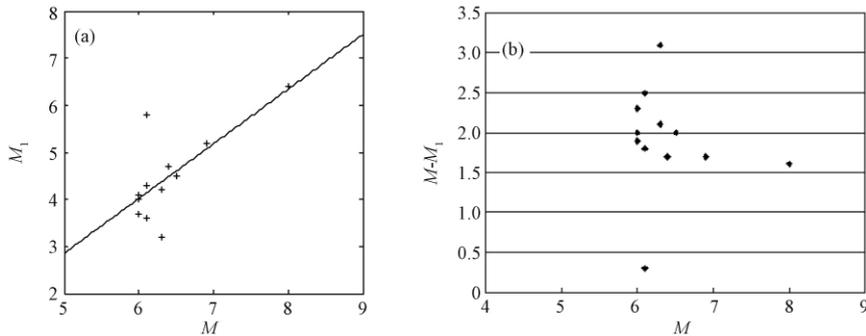


图3 逆断(逆冲)破裂的主震震级 M 与最大余震震级 M_1 间的关系(a)及 M 、 M_1 的差值关系(b)

3.3 正断地震的主震和最大余震的关系

拟合得到的正断破裂的主震震级 M 与最大余震震级 M_1 的经验关系式为

$$M_1 = 1.769 \times M - 6.292 \quad (5)$$

其中样本数 $N = 15$, 相关系数为 0.707, M_1 与 M 之间的线性关系较好(图 4(a))。相关系数都通过了置信概率 95% 的显著性检验。主震与最大余震的震级差为 0.6~1.8(图 4(b)), 其震级差的均值为 1.13, 与巴特定律中 1.2 的差值很接近, 这与统计的正断破裂中的主震序列类型大多为主余型的有关。

4 与已有研究结果的对比分析

由于以往研究都是以序列而不是以破裂类型分类,且本文仅就走滑破裂类型以序列分类统计了经验关系。由于同类型序列进行对比才有意义,因此本文仅把走滑破裂的各类型地震的经验公式和蒋海昆等(2006b)的经验公式(1)~(3)进行对比。由于蒋海昆等(2006b)统计的是序列 1 年内的最大余震,因此为了对比,对以上的统计进行修改,重新选取序列 1 年内的最大余震资料,得到走滑破裂的各类型地震的最大余震震级 M_1 与主震震

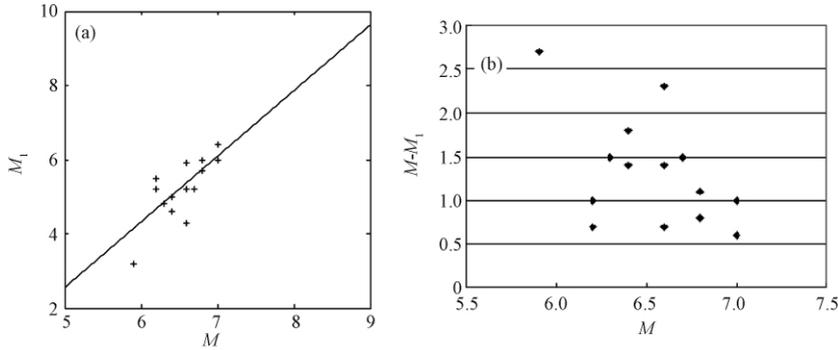


图 4 正断破裂的主震震级 M 与最大余震震级 M_1 间的关系 (a) 及 M 、 M_1 的差值关系 (b)

级 M 的经验关系式分别为

主余型:

$$M_1 = 0.761 \times M + 0.0609 \tag{6}$$

其中 $N = 62$, 相关系数为 0.554。

多震型:

$$M_1 = 1.173 \times M - 2.211 \tag{7}$$

其中 $N = 17$, 相关系数为 0.562。

孤立型:

$$M_1 = 1.195 \times M - 4.287 \tag{8}$$

其中 $N = 11$, 相关系数为 0.605。

以上相关系数都通过了置信概率 95% 的显著性检验。

由图 1 可以看出,走滑破裂的主震型和多震型的最大余震震级和主震震级的线性关系较离散。因此,选取线性关系较好的走滑破裂的孤立型地震进行了对比, M 为本文走滑破裂的孤立型主震震级,根据本文和蒋海昆等 (2006b) 中的经验公式得到拟合的最大余震 M_2 ,最大余震的拟合值 M_2 和实际数值 M_1 的差值见表 3、图 5。

表 3 本文的经验公式和蒋海昆等 (2006b) 的经验公式对比结果

主震 M	M_2 拟合值 - M_1 实际数值		
	本文结果		蒋海昆等 (2006b) 结果
6.0	0.5, 0.08, -0.5	1.23, 0.73, 0.23	
6.1	0.60	1.18	
6.2	-1.08	-0.56	
6.3	0.34	0.79	
6.4	-0.16, -0.46	0.35, 0.05	
6.6	0.4, 1.4	0.14, 1.14	
6.9	0.16	0.23	

由图 5、表 3 可以看出,本文经验公式拟合数值与实际数值的差值小于蒋海昆等 (2006b) 的差值,二者的差均值分别为 0.116 和 0.50,因此看来分破裂类型统计的结果更好。

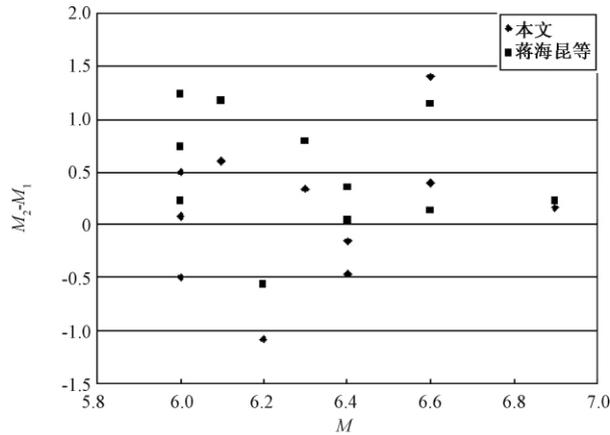


图5 本文结果和蒋海昆等(2006b)的结果的对比

5 结论及讨论

从以上分析可以得出以下几点认识:

(1) 中国大陆及边邻地区6级以上地震中走滑型地震占统计地震总数的70.5%, 逆断(逆冲)型地震占10.8%, 正断型地震占12.2%; 主余型序列类型在3种破裂类型中的比例均大于或等于60%, 其中, 在正断破裂中所占比例高达76.5%; 在走滑、逆断(逆冲)破裂类型中双震比例为20%~30%, 而在正断破裂类型中双震比例仅为5.9%。

如果不考虑破裂类型, 主余型地震占统计地震总数的70.4%, 多震型占18.4%, 双震型占8.8%, 孤立型占11.2%, 资料不全的占6.5%; 孤立型地震的破裂类型多为走滑型, 占总数的78.6%; 多震型和双震型地震的破裂类型也多为走滑性, 23组多震型地震中有14组为走滑型, 占总数的60.9%; 但在正断、逆断(逆冲)破裂类型中也有孤立型、多震型和双震型的地震。

(2) 对于1966年以来中国大陆及边邻地区6.0级以上地震, 不论何种破裂类型和序列类型, 在相同破裂类型和序列类型下, 主震与最大余震震级的关系在一定程度上表现为线性, 得到的经验公式可以为中国大陆同类地震的最大余震震级判定提供参考; 和前人的统计结果对比后可知, 对分破裂类型所做的统计结果更好。

(3) 1966年以来中国大陆及边邻地区6.0级以上地震主震与最大余震时间间隔之间的线性关系较差, 最大余震的发生存在一定的规律, 最大余震与主震的时间间隔见表4。

表4 1966年以来中国大陆及边邻地区6.0级以上地震的最大余震与主震时间间隔

地震破裂类型	序列类型	时间间隔为 t (天) 的百分比			
		$t < 1$	$t < 3$	$t < 10$	$t < 31$
走滑	主余型	30/63 = 47.6%	39/63 = 61.9%	39/63 = 61.9%	39/63 = 61.9%
	多震型	4/16 = 25%	4/16 = 25%	7/16 = 43.8%	12/16 = 75%
	孤立型	7/11 = 63.6%	7/11 = 63.6%	9/11 = 81.8%	9/11 = 81.8%
逆断(逆冲)		5/12 = 41.7%	7/11 = 58.3%	7/11 = 58.3%	10/11 = 83.3%
正断		7/15 = 46.7%	12/15 = 80.0%	12/15 = 80.0%	12/15 = 80.0%

从表 4 可以看出,除了走滑破裂的多震型以外,统计中其它类型的 40% 的主震与最大余震的时间间隔在都在 1 天之内,而走滑破裂的多震型 75% 的主震与最大余震的时间间隔是在 31 天以内。不论何种类型,最大余震发生在主震后 10 天内的比例为 43.8% ~ 81.8%,走滑型中的孤立型和正断型的最大余震发生在主震后 10 天内的比例高达 80%。

吴开统等(1990)统计中国大陆 1962 ~ 1987 年的 80 个地震序列中,最大余震发生在主震后两天内的占全序列的 65%;蒋海昆等(2006b)统计显示最大余震发生在主震后 10 天的序列比例为 68%;任雪梅(2005)统计了 1970 ~ 2003 年西北地区东部 34 个 5 级以上地震,最大余震发生在主震后 10 天内的比例为 52.3%;任雪梅等(2009)统计 1900 年以来我国西南地区最大余震发生在主震后 10 天内的比例 73%。而本文中统计的走滑型中的孤立型和正断型的最大余震发生在主震后 10 天内的比例高达 80%,高于西北地区东部、全国和西南地区的比例,因此该类型的地震在地震序列判定中应注意最大余震的发生时间。

(4) 查阅 2013 年 4 月 20 日四川芦山主震后 5 个月内的余震资料可知,芦山主震震级为 7.0,最大余震震级为 5.4,余震发生在主震后的第 2 天,芦山地震为逆冲型。

利用本文的统计结果,作者对芦山主余震做了以下分析:利用本文的主震和最大余震震级的经验公式,得到芦山地震的最大余震震级为 5.5,与实际的震级误差为 0.1,在标准差 1.33 的范围内;芦山地震的最大余震与主震间隔 1.4 天,符合本文统计的 58.3% 中国大陆及边邻地区主震的最大余震发生在主震后 3 天内,这也从一个侧面验证了本文的统计结果是比较可靠的。根据本文 K-K 法的规定,7 级地震余震统计时间是 730 天,但目前仅有四川芦山主震后 5 个月内的余震资料,因此以上分析结果有待时间的检验。

参考文献

- 陈棋福,2002a,中国震例(1992 ~ 1994),北京,地震出版社。
- 陈棋福,2002b,中国震例(1995 ~ 1996),北京,地震出版社。
- 陈棋福,2002c,中国震例(1997 ~ 1999),北京,地震出版社。
- 陈棋福,2008,中国震例(2000 ~ 2002),北京,地震出版社。
- 蒋海昆、李永莉、曲延军等,2006a,中国大陆中强地震序列类型空间分布特征,地震学报, **28**(4),389 ~ 398。
- 蒋海昆、曲延军、李永莉等,2006b,中国大陆中强地震余震序列的部分统计特征,地球物理学报, **49**(4),1110 ~ 1117。
- 任雪梅,2005,西北地区东部 5 级以上地震余震删除研究,硕士论文,兰州:中国地震局兰州地震研究所。
- 任雪梅、高孟潭、刘爱文等,2009,1900 年以来我国西南地区强余震统计特征,震灾防御技术, **4**(2),200 ~ 208。
- 吴开统、焦远碧、吕培苓等,1990,地震序列概论,97 ~ 118,北京:北京大学出版社。
- 张肇诚,1988,中国震例(1966 ~ 1975),北京,地震出版社。
- 张肇诚,1990a,中国震例(1976 ~ 1980),北京,地震出版社。
- 张肇诚,1990b,中国震例(1981 ~ 1985),北京,地震出版社。
- 张肇诚,1999,中国震例(1986 ~ 1988),北京,地震出版社。
- 张肇诚,2000,中国震例(1989 ~ 1991),北京,地震出版社。
- 周蕙兰、房桂荣、章爱娣等,1982,余震序列的持续时间,地震学报, **4**(1),45 ~ 54。
- Chapman M C, Powell C A, Vlahovic G, et al,1997, A statistical analysis of earthquake focal mechanisms and epicenter locations in the eastern Tennessee seismic zone, Bull Seism Soc Am, **87**(6),522 ~ 536。
- Lutz T M,1986, An analysis of the orientation of large scale crustal structures: A statistical approach based on areal distributions of pointlike features, J Geophys Res, **91**(B1),421 ~ 434。
- Lutz T M, Gutmann J T,1995, An improved method for determining and characterizing alignments of pointlike features and its

- implications for the Pinacate volcanic field, Sonora, Mexico, *J Geophys Res*, **100** (B9), 17659 ~ 17670.
- Keilis-Borok V I, Knopoff L, 1980, Bursts of aftershock of strong earthquakes, *Nature*, **238** (P5744), 259 ~ 263.
- Ustu T A, 1961, Statistical study on the occurrence of aftershocks, *Geophys Mag*, **30**, 521 ~ 605.

Statistic features of maximum aftershock of earthquake sequences with $M_s \geq 6.0$ in Chinese mainland and its border region

Ren Xuemei Tan Junlin Ma Heqing Zeng Xianwei

Earthquake Administration of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China

Abstract Based on data of earthquake sequences with $M_s \geq 6.0$ in Chinese mainland and the border region since 1966, the paper studies different rupture types of the main shock and aftershock sequence characteristics under different fracture types. We obtain the experiential formula of the different proportion of aftershock, distribution of advantage, magnitude difference between main shock and maximum aftershock under different fracture types. Main shock magnitude and maximum aftershock magnitude have good linear relationship, and this kind empirical formula can provide the reference for the determination of maximum aftershock magnitude in Chinese mainland. The occurrence of maximum aftershock within 10 days after the main shock is 43.8% ~ 81.8%, while that of isolated maximum aftershock of strike-slip type and normal fracture type within 10 days after the main shock is up to 80%.

Key words: Chinese mainland and its border region Sequence type Fracture type
Magnitude of maximum aftershock Time interval Magnitude of mainshock